

微波-光波变电长度缩比条件下目标雷达散射截面相似性研究*

何晶[†] 苗强 吴德伟

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2014年2月23日收到; 2014年6月5日收到修改稿)

利用光源体积较小且容易实现的特点, 提出了将微波大尺度缩比到可见光波段, 采用光源辐射产生的光波缩比测量目标在微波频段雷达散射截面的思想, 讨论了由此带来的原型系统中目标几何尺寸不能缩得很小而导致的必须变电长度缩比问题, 深入研究了在这种非等比的非精确相似条件下目标雷达散射截面的相似性关系, 以及符合这种相似性关系的微波-光波变电长度缩比仿真雷达散射截面的约束条件和补偿方法. 研究成果为在实验室等较小场地实现大型电磁系统缩比仿真测量实验提供了新思路.

关键词: 雷达散射截面, 缩比测量, 微波, 光波

PACS: 03.65.Nk, 41.20.Jb, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.63.200301

1 引言

缩比测量是研究目标雷达散射截面的主要手段之一. 依据Stratton提出的经典电磁相似律, 当所有的线性尺寸按同样的比例 S 缩小时, 电磁场的性质不变. 因此当目标的体积缩小 $1/S$, 相应的辐射波长也应该缩小 $1/S$, 即频率增加 S 倍, 这时就可认为缩比模型与实际目标在工作波长下有相同的电参数和特性, 测量或预估计算缩比模型的特性就可得到实际目标的特性. 应用这种电磁相似技术在20世纪60年代初期就曾成功用于理想导体目标的电磁散射测量, 且已经有比较成熟的理论和方法.

理想的电磁缩比测量要求模型各部分的电长度(几何长度和工作波长之比)与原型对应部分的电长度有相同的值, 且模型的介质参数与原型对应部分的介电参数满足给定的关系. 但是, 在很多实际应用中, 缩比实验并不能满足上述要求. 如在频率范围300 MHz—30 GHz之间微波频段, 按照

1 : 1—1 : 1000 缩比系数, 缩比后的辐射源频率通常在300 MHz—30 THz之间, 这些频段的辐射源仍然比较复杂, 体积庞大, 成本较高, 甚至某些频段(如太赫兹频段)辐射源产生都相当困难, 使得在实验室等较小场地无法实现缩比测量实验. 在这方面, 国外很多研究机构如英国国家无线电缩比模型实验室、美国马萨诸塞州立大学亚毫米波技术实验室、美国陆军高级仿真中心、美国雷锡恩(Raytheon)公司导弹系统分部等, 都进行了大量的研究, 研制满足精确相似条件下的辐射源成为研究的重点和难点^[1-3]. 随着近代光学技术的进步和发展, 光源以其较小的体积、较易实现的特点得到广泛应用, 如果将微波大尺度缩比到可见光波段, 采用光源辐射产生的光波缩比测量目标微波雷达散射截面, 从辐射源的角度考虑无疑是一个较好的选择. 但是, 可见光频段为 $(3.7-7.5) \times 10^{14}$ Hz, 而微波频段为 $3 \times 10^8-3 \times 10^{10}$ Hz, 将微波波长缩至可见光频段, 缩小比例约为 $1/100000-1/10000$, 如此大的缩比系数就可能使得原型系统中的某些物体几何尺寸缩到很小, 甚至在精确相似条件下微缩到

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61104056)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 75541650@qq.com

难以制作的程度. 为此, 能否采取变电长度缩比系数, 即将电磁系统的辐射源大尺度缩比到可见光波段, 而目标的几何尺寸则根据实验需要和制作要求以不同的缩比系数来实现. 这就带来了需要研究当波长与目标尺寸缩比因子不一致时, 模型和原型系统之间 RCS 的相似关系以及如何应用目标的光波雷达散射截面反演预估目标的微波雷达散射截面的问题. 目前对这一问题的研究较少, 相关研究只见到文献 [4] 针对可见光、近红外波段目标介电特

性、粗糙度变化剧烈的情况, 研究了不改变入射波长时目标散射特性与尺寸的关系. 我们对变电长度缩比条件下的雷达散射截面 (RCS) 测量问题进行了研究, 有关理论和方法对于雷达目标电磁散射特性测量方法的研究具有促进意义.

2 经典相似律的分析思想 [5]

对于由目标 A, 场源 C 和传播媒质 B 组成的原型电磁系统, 依据麦克斯韦方程可得:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}(x, y, z, t) = -\mu(x, y, z) \frac{\partial \mathbf{H}(x, y, z, t)}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H}(x, y, z, t) = \rho(x, y, z) \mathbf{E}(x, y, z, t) + \varepsilon(x, y, z) \frac{\partial \mathbf{E}(x, y, z, t)}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} , \mathbf{H} 为 t 时刻点 (x, y, z) 处的电场强度和磁场强度; ρ, μ, ε 分别是点 (x, y, z) 处的电导率、介电常数和磁导率. 设另一电磁系统 (模型系统, 各变量均用带撇的符号表示), 其目标 A' 的几何形状与 A 相似, 尺寸为 A 的 $1/p$, 称 p 为几何缩比因子, 该电磁系统也可用麦克斯韦方程描述:

$$\begin{cases} \nabla' \times \mathbf{E}'(x', y', z', t') = -\mu'(x', y', z') \frac{\partial \mathbf{H}'(x', y', z', t')}{\partial t'}, \\ \nabla' \times \mathbf{H}'(x', y', z', t') = \rho'(x', y', z') \mathbf{E}'(x', y', z', t') + \varepsilon'(x', y', z') \frac{\partial \mathbf{E}'(x', y', z', t')}{\partial t'}. \end{cases} \quad (2)$$

两个坐标系之间满足下列关系:

$$\begin{aligned} x &= px'; y = py'; z = pz', \\ t &= \gamma t', \\ E(x, y, z, t) &= \alpha E'(x', y', z', t'), \\ H(x, y, z, t) &= \beta E'(x', y', z', t'), \end{aligned} \quad (3)$$

其中, p, γ, α, β 分别为尺寸缩比因子、时间缩比因子、电场强度缩比因子以及磁场强度缩比因子. 将 (3) 式代入 (2) 式, 经过化简, 可得到模型系统与原型系统应满足的物理相似条件为

$$\begin{aligned} \rho'(x', y', z') &= \frac{p\alpha}{\beta} \rho(x, y, z), \\ \varepsilon'(x', y', z') &= \frac{p\alpha}{\beta\gamma} \varepsilon(x, y, z), \\ \mu'(x', y', z') &= \frac{p\beta}{\alpha\gamma} \mu(x, y, z). \end{aligned} \quad (4)$$

理论上讲, 对于任意给定的一组缩比因子 $(p, \gamma, \alpha, \beta)$, 都可以构成一个物理相似的电磁系统. 但若考虑传播媒质 B 为自由空间, 即

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \varepsilon = \varepsilon_0, \\ \mu' &= \mu = \mu_0, \end{aligned} \quad (5)$$

则由 (4), (5) 式可得 $\alpha = \beta; p = \gamma$. 由于系统介质包括波的传播媒质和散射体材料, 因此介质特性相

同, 也同时要求散射体材料介质特性在原型系统和模型系统中都相同, 满足以上条件的相似系统, 根据电磁系统中各物理量的定义, 可以得出符合经典电磁相似律的相似系统中各物理量之间的关系, 如表 1 所示.

表 1 相似电磁系统中变量之间的相似关系

物理量	原型系统	模型系统
长度	l	$l' = l/p$
时间	t	$t' = t/p$
频率	f	$f' = fp$
波长	λ	$\lambda' = \lambda/p$
波常数	k	$k' = kp$
电导率	ρ	$\rho' = \rho p$
磁导率	μ	$\mu' = \mu$
介电常数	ε	$\varepsilon' = \varepsilon$
表面阻抗	H	$\eta' = \eta$
天线增益	g	$g' = g$
散射截面	σ	$\sigma' = \sigma/p^2$

因此, 只要模型各部分的电长度 (几何长度和工作波长之比) 与原型对应部分的电长度有相同的值, 且模型系统中的散射体材料介质参数与原型系

统对应部分的散射体介质参数相同, 即可以通过测量模型系统中目标的雷达散射截面, 计算出原型系统的雷达散射截面 ($\sigma = \sigma' \cdot p^2$).

3 简单形体目标变电长度缩比条件下 RCS 测量的相似性分析

若模型系统中目标尺寸缩比系数与波长的缩比系数不相等, 即 $\frac{l}{l'} = p$; $\frac{\lambda}{\lambda'} = \gamma$; $p \neq \gamma$, 是否能够得到模型系统和原型系统之间的雷达散射截面之间的关系, 从而依据模型系统的雷达散射截面反演得到原型系统的雷达散射截面.

为了定量描述变尺度缩比条件下雷达散射截面之间的关系, 可以考虑在原型系统 a 和模型系统 c 之间假想一个中间模型系统 b, 其中 a 与 b 之间满足经典相似律, 缩比系数为 γ , 而 b 与 c 之间目标尺寸缩比系数为 $\frac{p}{\gamma}$, 波长相同, 散射体材料介质参数

不变. 三个系统之间的缩比关系如图 1 所示.

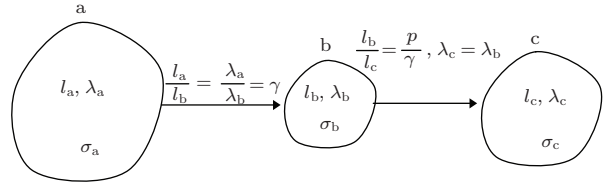


图 1 原型系统-假想系统-模型系统之间的缩比关系

由于系统 a 和 b 满足经典相似律, 则有 $\sigma_a = \sigma_b \cdot \gamma^2$, 而系统 b 和 c 波长相同, 目标尺寸不相同, 则需要讨论目标尺寸大小对雷达散射截面的影响. 由于通常雷达目标的尺寸都比波长大得多, 他们处于散射特性的光学区, 因此可以按照光学的方法计算大型雷达目标的散射截面. 应用驻相算法得到的典型简单形状散射体 (散射体表面上没有两个或两个以上相互分开的镜面反射点) 随尺寸大小影响雷达散射截面的计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_b = q^2 \sigma_c, \\ q^2 = c^n f^2(c, x_m), \\ f(c, x) = \cos^{c-1}(\pi x) - \frac{(c-1)(c-2)}{3!} \cos^{c-3}(\pi x) \sin^2(\pi x) + \dots, \end{cases} \quad (6)$$

其中 c 是几何缩比因子 ($c = \frac{p}{\gamma}$), x_m 是在入射平面内与模型几何长度、入射角和波长有关的代表值, 指数 n 取决于散射点的几何形状. x_m 和 n 均由实验确定. 由此, 可得到变尺度缩比情况下目标雷达散射截面的缩比关系为

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \gamma^2 \cdot \sigma_b \\ &= \gamma^2 \cdot q^2 \sigma_c \\ &= \gamma^2 \cdot \left(\frac{p}{\gamma}\right)^n f^2\left(\frac{p}{\gamma}, x_m\right) \sigma_c. \end{aligned} \quad (7)$$

由此, 则可以通过测量变尺度缩比后的目标雷达散射截面, 推算出原型系统的雷达散射截面.

当目标为简单形状, 且只考虑目标后向散射截面时, (7) 式有更简洁的表达式.

1) 对于球面目标的后向雷达散射截面

$$\sigma_a = \gamma^2 \cdot q^2 \sigma_c = \gamma^2 \cdot \left(\frac{p}{\gamma}\right)^2 \sigma_c = p^2 \sigma_c. \quad (8)$$

2) 对于柱面目标的后向雷达散射截面

$$\sigma_a = \gamma^2 \cdot q^2 \sigma_c = \gamma^2 \cdot \left(\frac{p}{\gamma}\right)^3 \sigma_c = \frac{p^3}{\gamma} \sigma_c. \quad (9)$$

3) 对于平面目标的后向雷达散射截面

$$\sigma_a = \gamma^2 \cdot q^2 \sigma_c = \gamma^2 \cdot \left(\frac{p}{\gamma}\right)^4 \sigma_c = \frac{p^4}{\gamma^2} \sigma_c. \quad (10)$$

本文选取了平面目标和圆柱目标进行了仿真实验验证, 选取微波频率为 5×10^9 Hz, 光波频率为 4.7×10^{14} Hz (波长为 633 nm), 波长缩比系数 γ 约为 100000000, 尺寸缩比系数 p 为 1000. 首先, 本文利用三维电磁分析软件 FEKO 计算了 5 GHz 下矩形平面 (边长 1 m)、圆柱 (高 1 m、底半径 0.5 m) 的单站雷达散射截面积, 仿真结果如图 2 和图 3 中的实线所示; 然后应用 Matlab 采用物理光学法对缩比到光波频段下 (波长 633 nm) 的矩形平面 (边长 0.001 m)、圆柱 (高 0.001 m、底半径 0.0005 m) 的单站散射截面积进行了仿真, 并按照变尺度缩比条件, 根据 (9), (10) 式计算变尺度条件下的 5 GHz 下矩形平面 (边长 1 m)、圆柱 (高 1 m、底半径 0.5 m) 单站散射截面积, 计算结果如图 4 和图 5 所示. 由仿真结果可以看出, 运用变尺度缩比的估算结果与采用 FEKO 进行仿真得到结果完全符合.

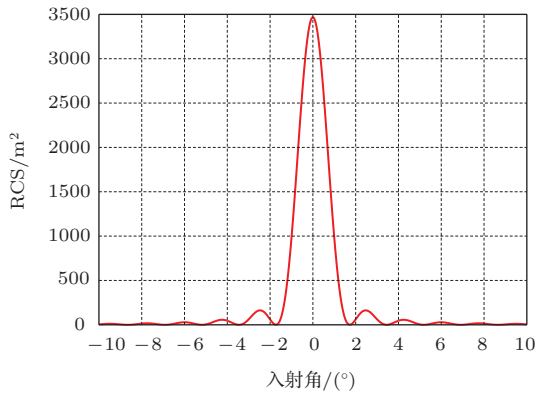


图2 FEKO 仿真矩形单站 RCS (5 GHz, 边长 1 m)

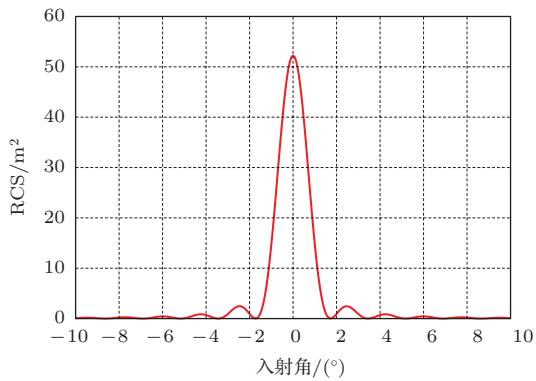


图3 圆柱单站 RCS (5 GHz, 高 1 m, 底半径 0.5 m)

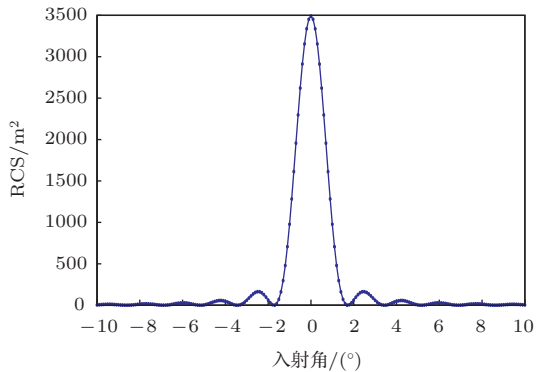


图4 变尺度缩比计算矩形导体单站 RCS

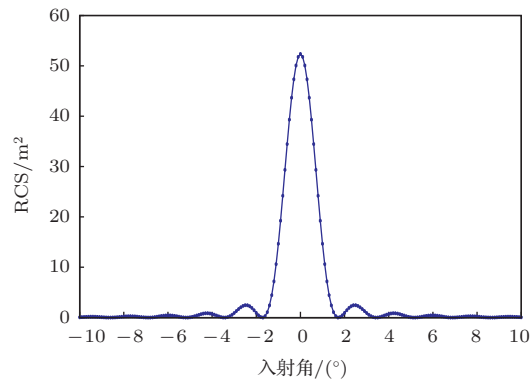


图5 变尺度缩比计算圆柱的单站 RCS

4 微波-光波变电尺度缩比 RCS 估算的约束条件

虽然光波是电磁波的一种, 两者 RCS 研究方法有一致的地方, 但在如此大尺度的缩比条件下, 光波波段的雷达散射截面和微波波段的雷达散射截面存在一定的差别, 主要表现在: 在可见光、红外波段, 由于目标线度远远大于波长及趋肤效应的存在, 任何目标实际上是具有粗糙表面、有限介电常数的物体, 目标在光波段的雷达散射截面除与目标形状、尺寸、入射波长等有关外, 更与目标表面的粗糙度统计特性及材料的介电特性存在着明显的依赖关系. 因此, 在光波-微波大尺度缩比条件下应用光波波段的雷达散射截面估算微波波段的雷达散射截面, 还必须要考虑目标的粗糙度及介电特性变化带来的影响.

无论是在微波波段还是在光波段, 对粗糙面散射特性研究目前有大量的较为成熟的研究成果, 主要的研究方法有: 基于 Kirchoff 近似的物理光学方法, 几何光学法, 小微扰方法, 全波法, 数值计算方法等^[6-8]. 依据基于 Kirchoff 近似的物理光学方法, 具有粗糙表面凸形物体的光频相干后向散射截面的理论计算公式如下:

$$\langle \sigma \rangle_c = \sigma_B |\langle R_p(0) \rangle|^2 \cdot |\chi(-2k_0)|^2, \quad (11)$$

其中 σ_B 对应于光滑理想导体的后向散射截面; $|\langle R_p(0) \rangle|^2$ 为平面波垂直入射时反射率的平均值; $\chi(-2k_0)$ 为表面起伏特征函数, 它是粗糙表面高度起伏的概率密度函数的 Fourier 变换, 表征粗糙表面高度起伏造成的对光滑物体表面反射的发散程度.

由 (11) 式可以看出, 光滑目标和粗糙目标的后向散射截面积差一个比例因子 $|\chi(-2k_0)|^2$, 因此对于微波频段是光滑的目标, 而在光波频段是粗糙的目标, 可以通过测量出光波频段粗糙目标的雷达散射截面积除以 $|\chi(-2k_0)|^2$ 进行补偿. 从缩比试验的应用角度来说, 依据经典的缩比理论, 在光波和微波下应采用相同介电特性的材料, 这就需要重新制备满足缩比波长照射下的与原形材料介电常数相等的介质材料. 然而通常情况下, 这种缩比条件下满足介电常数精确相等的模型材料一般难以制备. 若在缩比系统中仍使用原型目标的基体材料或者其他近似满足介电常数相似条件的材料, 由 (11) 式

可以看出, 这种由于光波与微波频段目标的介电特性发生的变化, 可由菲涅耳反射系数来进行补偿, 即若在微波频段目标的平面波垂直入射时反射率平均值为 $|\langle R'_p(0) \rangle|^2$, 光波频段下目标的平面波垂直入射时反射率平均值 $|\langle R_p(0) \rangle|^2$, 则补偿因子为

$$\frac{|\langle R'_p(0) \rangle|^2}{|\langle R_p(0) \rangle|^2} (|\langle R'_p(0) \rangle|^2 \neq 0).$$

综上所述, 应用光波变尺度缩比估算微波波段雷达散射截面估算的基本思路为:

- 1) 测量变尺度缩比条件下光波频段下目标 RCS;
- 2) 应用 (7) 式估算微波频段下目标 RCS;
- 3) 补偿由于目标在微波和光波频段粗糙度不一致造成的影响;
- 4) 补偿由于目标在微波和光波频段介电特性不一致造成的影响;
- 5) 估算微波频段下的目标 RCS.

5 结 论

以光源较小的体积、较易实现的特点, 将微波大尺度缩比到可见光波段, 采用光源辐射光波来模拟电波, 使得在实验室等较小场地就能进行 RCS 的缩比测量实验, 从辐射源的角度考虑无疑是一个较好的选择, 这同时带来了当波长与目标尺寸缩比因子无法一致时, 模型和原型系统之间 RCS 的相

似关系问题.

本文主要研究了简单形体目标微波-光波变电尺度缩比条件下 RCS 之间的相似关系, 提出了应用光波变电尺度缩比估算微波波段目标 RCS 的基本思路和研究方法, 为 RCS 的预估提供了一种新思路.

参考文献

- [1] Li Q, Xue K 2012 *Laser Optoelectr. Prog.* **49** 060001 (in Chinese) [李琦, 薛凯 2012 激光与光电子学进展 **49** 060001]
- [2] Robert G, Achim E 2008 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **50** 485
- [3] Andriy A D, Thomas M G, Jerry W 2009 *Opt. Express* **17** 7525
- [4] Lin X B 1998 *Aerodyn. Missile J.* **28** 52 (in Chinese) [林溪波 1998 飞航导弹 **28** 52]
- [5] Zhuang Z W, Yuan N C, Mo J J 2007 *Prediction and Measurements of RCS of Military Targets* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) p158 (in Chinese) [庄钊文, 袁乃昌, 莫锦军 2007 军用目标雷达散射截面预估与测量 (第一版) (北京: 科学出版社) 第 158 页]
- [6] Li Y L, Huang J Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7630 (in Chinese) [李应乐, 黄际英 2008 物理学报 **57** 7630]
- [7] Zhang Y, Zhang X J, Fang G Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184203 (in Chinese) [张宇, 张晓娟, 方广有 2012 物理学报 **61** 184203]
- [8] Zhang Y, Yang X, Gou M J, Shi Q F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3905 (in Chinese) [张宇, 杨曦, 苟铭江, 史庆藩 2010 物理学报 **59** 3905]

Microwave and light wave radar cross section similitude with unequal electrical length*

He Jing[†] Miao Qiang Wu De-Wei

(Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 23 February 2014; revised manuscript received 5 June 2014)

Abstract

According to small size and easy-to-realize features of visible light radiator, a new idea of adopting light wave produced by light radiator models to measure an object microwave radar cross section (RCS) at big scale factor is presented. The similitude of object RCS in unequal electrical length condition is discussed. The constrained condition and compensation process for such a model measurement are also provided.

Keywords: radar cross section, model measurement, microwave, light wave

PACS: 03.65.Nk, 41.20.Jb, 42.68.Mj

DOI: [10.7498/aps.63.200301](https://doi.org/10.7498/aps.63.200301)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61104056).

[†] Corresponding author. E-mail: 75541650@qq.com